

10/532044 #2
Rec'd PCTO 21 APR 2005
PCT/JP 2004/001230

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

05. 2. 2004

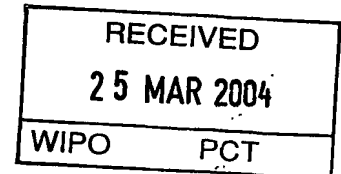
別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日
Date of Application: 2003年 2月 6日

出 願 番 号
Application Number: 特願2003-029244
[ST. 10/C]: [JP 2003-029244]

出 願 人
Applicant(s): 住友電気工業株式会社

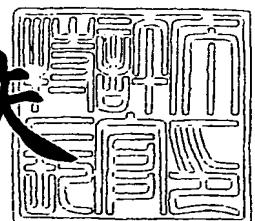


PRIORITY DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) OR (b)

2004年 3月11日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

今井康夫



BEST AVAILABLE COPY

出願番号 出願特 2004-3018918

【書類名】 特許願

【整理番号】 102H0849

【提出日】 平成15年 2月 6日

【あて先】 特許庁長官 太田 信一郎 殿

【国際特許分類】 G02B 05/18
G06F 17/50
G06F 15/60
B23K 26/00

【発明者】

【住所又は居所】 大阪府大阪市此花区島屋一丁目1番3号住友電気工業株式会社大阪製作所内

【氏名】 布施 敬司

【特許出願人】

【識別番号】 000002130

【氏名又は名称】 住友電気工業株式会社

【代表者】 岡山 紀男

【代理人】

【識別番号】 100079887

【住所又は居所】 大阪府大阪市東成区中道3丁目15番16号毎日東ビル
7 0 5

【弁理士】

【氏名又は名称】 川瀬 茂樹

【電話番号】 06-6974-6321

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 000516

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9715687

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 回折型光学部品およびそれを用いたレーザ加工装置

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 レーザ光の 1 波長分に対応する g 通りの厚みをとる寸法 $a \times b$ で厚みに対応して g 通りの複素振幅透過率 t_{mn} が与えられる透明矩形セルを縦横に $R \times S$ 個並べた構造を有し、入射した平行ビームを、光軸に対して (α_k, β_k) の角度をなす有限個の分岐ビーム k ($k = 1, 2, \dots, K$) に分岐する回折型光学部品であって、

同一のセル配置を有するユニットパターンが繰り返すという構造をもたず、 R S 個のセルは全て他のセルの値に拘束されずに複素振幅透過率 t_{mn} を与えることができ、

K 個の分岐ビームの角度 (α_k, β_k) が二つの正の定数 U と V と公約数のない k 個の適当な整数 m_k, n_k によって

$$\sin \alpha_k = m_k U$$

$$\sin \beta_k = n_k V$$

というように表現され、かつ前記正の定数 U, V の両方あるいはどちらかがレーザ光波長 λ を回折型光学部品の寸法 aR, bS で割った値よりも小さい

$$U < \lambda / aR$$

$$V < \lambda / bS$$

というものであるようにした事の特徴とする回折型光学部品。

【請求項 2】 回折型光学部品の $a \times b$ の大きさの横 m 番目、縦 n 番目のセル (m, n) がレーザ光の 1 波長 λ 分に対応する g 通りの t_{mn} の振幅透過率をもち、横回折角 α 、縦回折角 β で回折された場合の回折光の複素振幅を $W(\alpha, \beta)$ として

【数 1】

$$W(\alpha, \beta) = \text{sinc}\left(\frac{a\alpha}{\lambda}\right) \text{sinc}\left(\frac{b\beta}{\lambda}\right) \sum_m \sum_n t_{mn} \exp\{-jk(ma\alpha + nb\beta)\}$$

によって与え、高速フーリエ変換 (FFT) を用いないで計算し、有限の $W(\alpha$

, β) を与える (α, β) の幾つかは等角度で縦横に分布する格子点から外れた角度であるようにし、

光軸に対して (α_k, β_k) の角度をなす有限個の分岐ビーム k ($k = 1, 2, \dots, K$) に分岐する場合は、

K 個の分岐ビームの角度 (α_k, β_k) が二つの正の定数 U と V と公約数のない k 個の適当な整数 m_k, n_k によって

$$\sin \alpha_k = m_k U$$

$$\sin \beta_k = n_k V$$

というように表現され、かつ前記正の定数 U, V の両方あるいはどちらかがレーザ光波長 λ を回折型光学部品の寸法 a, b で割った値よりも小さい

$$U < \lambda / a$$

$$V < \lambda / b$$

というものであるようにした事の特徴とする回折型光学部品。

【請求項 3】 無限大の焦点距離を有するフラウンホーファー型であることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の回折型光学部品。

【請求項 4】 有限の焦点距離を有するフレネル型であることを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の回折型光学部品。

【請求項 5】 DOE からの分岐ビームの計算を高速フーリエ変換を用いることなく各々の画素からの寄与を全部足し合わせるによって全体の振幅透過率パターンを決定するようにした請求項 1 に記載の回折型光学部品。

【請求項 6】 所望の方向の分岐ビーム (α_k, β_k) の回折振幅 $W(\alpha_k, \beta_k)$ 計算は高速フーリエ変換を用いず、分岐ビームの周辺のノイズ光の計算を高速フーリエ変換 FFT によって行いノイズ光のための計算時間を削減し、所望の分岐ビーム強度と、ノイズ低減という二つの目的を満足するようにセルの振幅透過率分布 t_{mn} を決定することを特徴とする請求項 1 ～ 5 の何れかに記載の回折型光学部品。

【請求項 7】 レーザ光を発生するレーザ装置と、

レーザ光の 1 波長分に対応する g 通りの厚みをとる寸法 $a \times b$ で厚みに対応して g 通りの複素振幅透過率 t_{mn} が与えられる透明矩形セルを縦横に $R \times S$ 個並

べた構造を有し、入射した平行ビームを、光軸に対して (α_k, β_k) の角度をなす有限個の分岐ビーム k ($k=1, 2, \dots, K$) に分岐する回折型光学部品であって、同一のセル配置を有するユニットパターンが繰り返すという構造をもたず、 RS 個のセルは全て他のセルの値に拘束されずに複素振幅透過率 t_{mn} を与えることができ、 K 個の分岐ビームの角度 (α_k, β_k) が二つの正の定数 U と V と公約数のない k 個の適当な整数 m_k, n_k によって $\sin \alpha_k = m_k U$ 、 $\sin \beta_k = n_k V$ というように表現され、かつ前記正の定数 U, V の両方あるいはどちらかがレーザ光波長 λ を回折型光学部品の寸法 aR, bS で割った値よりも小さい $U < \lambda / aR, V < \lambda / bS$ というものであるようにした回折型光学部品と、

回折型光学部品で生成された分岐ビームを対象物の所望の多点に集光するレンズとよりなる事の特徴とするレーザ加工装置。

【請求項 8】 集光レンズが $f \sin \theta$ レンズであることを特徴とする請求項 7 に記載のレーザ加工装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は 1 本のレーザビームを、規則正しく格子状に想定された格子点以外の点にもビーム分岐できる回折型光学部品と、それを用いたレーザ加工装置、特に穴開け、溶接半田付け、表面処理など電子部品の微細加工に用いることができる多点一括レーザ加工装置に関する。

【0002】

【従来の技術】

(1) 特開 2000-231012 号「回折型光学部品の設計方法」

これは本発明者による先願の発明の一つである。レーザ光を分岐する機能を有する回折型光学部品 (DOE: フラウンホーファー型) を提案している。DOE とパターン最適化に用いる評価関数に製造エラーの影響を入れ、特に許容誤差の範囲 (公差) が小さいパラメータに関して公差を広げ容易に製造できるような設計方法を与える。

【0003】

縦横にセルを配列した単位となるユニットパターンを決め、ユニットパターンを縦横に並べDOE全体のパターンとする。回折ビームの強度計算は、高速フーリエ変換 (FFT; Fast Fourier Transform) アルゴリズムを使用している。

【0004】

(2) 特許第3346374号「レーザ穴開け加工装置」

これは本発明者による先願発明の一つである。レーザ光を回折型光学部品 (DOE) によって多数のビームに分割し $f \sin \theta$ レンズを用いて対象物面に等間隔で等しい口径の同等の穴を多数同時に穿孔することができるようにしたものである。回折型光学部品 (DOE; Diffractive Optical Element; フラウンホーファー型およびフレネル型) と $f \sin \theta$ レンズを組み合わせることによって、穴加工の位置精度を高める。レーザ光の高次の回折光まで位置ずれなく有効に利用できる。多数の穴を瞬時にして一括穿孔することができる。様々の利点がある。

【0005】

ここでDOEというのは、「一定の空間周期 Λ の同一の繰り返しパターン (ユニットパターン) あるいは一定の空間周期 Λ の同一パターンを変調した繰り返しパターンを含みレーザ光を回折して多数のビームを発生するもの」というように定義している。つまりDOEはあるユニットパターン Υ を決定し、その同じパターンを縦に G 個、横に H 個繰り返し設けるとするものとして作られる。

【0006】

だからユニットパターン Υ の決定がDOEの設計と等しいということになる。DOEは縦に R 、横に S 個の多数のセル C (最小単位) が並んでおり、その厚みが $g = 2^s$ (s は整数) 通りあって、それがレーザ光の1波長分の相違に対応する。多数のセル $C \{ (m, n) \}$ の 2^s 種類の厚み $\{ d_{mn} \}$ を決定することが本来のDOEの設計である。

【0007】

それはそうなのであるが実際にはもっと単純化されていた。実際には全セル R S 個がそれぞれ自由度をもっているのではなく拘束条件があった。これまでのD

OEは必ずユニットパターン Υ というDOEより小さい単位に含まれるセル $\{(m, n)\}$ の厚み $\{d_{mn}\}$ を決め、同じユニットパターン Υ を縦横に並べるというようになっていた。だからDOE全体の自由度の大きい問題をユニットパターン Υ だけの自由度の少ない問題に置き換えていたのである。

【0008】

セルが x 軸方向に P 個、 y 軸方向に Q 個並んだ物がユニットパターン Υ である。ユニットパターン Υ の含むセル数は PQ 個である。だから設計すべき対象のセル C の数はDOE全体のセルの数ではなくユニットパターン Υ のセルの数 PQ に限られていたのである。

【0009】

ユニットパターン Υ が横に(x 軸方向) G 個、縦(y 軸方向)に H 個並んで一つのDOEが構成される。ここで階層構造を纏めておくと次のようになる。

【0010】

| | | |
|---------------------|---|-------------------------|
| セル C | 横寸法 a 、縦寸法 b | (最小単位) |
| ユニットパターン Υ | $P \times Q$ のセル | 横寸法 Pa 、縦寸法 Qb |
| DOE | $G \times H$ のユニットパターン | 横寸法 GPa 、縦寸法 HQb |
| DOE | $R \times S$ のセル | ($R = PG$ 、 $S = HQ$) |
| m, n | 従来例ではユニットパターン内でのセルの座標 | |
| d_{mn} | (m, n) セルの厚み $g = 2^s$ 種類の厚みのどれかをもつ | |
| t_{mn} | (m, n) セルの複素透過率 | |
| m, n | 本発明ではDOE内でのセルの座標 | |
| p, q | 従来例において回折ビームの方位を示す次数 (整数) | |
| α, β | 本発明において回折ビームの方位を示す方向角 (連続数) | |

【0011】

以後もこのような記号を使うことにする。DOEに含まれるセルの数は RS 個 ($=PGHQ$) である。一つのセルは $g = 2^s$ (s は整数) 通りの厚みを取るから、DOE全体の自由度は gRS ($=2^sPGHQ$) であるが、同じユニットパターン Υ を繰り返すので実際の自由度は gPQ にすぎない。つまり設計の自由度はDOE全体の自由度 $gPGHQ$ をユニットパターン Υ の数 GH で割った数 gP

Qに等しい。以後設計すべきセルの数だけを問題にし一つのセルの自由度 g は問題にしない。だから自由度と単純にいうときは設計対象のセルの数 ($P\ G\ H\ Q$ 又は $P\ Q$) を指している。

【0012】

例えばユニットパターン Υ が千個 ($P\ Q = 1\ 0\ 0\ 0$) のセルを含み、DOE が千個 ($G\ H = 1\ 0\ 0\ 0$) のユニットパターンを含むとすると、DOE は百万個 ($P\ Q\ G\ H = 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0$) のセルを含むが百万個のセルの全部について厚みを計算しなくてよいのであって、千個分のセルだけについて厚みを決めれば良い。

【0013】

それは計算の量を著しく少なくしている。ユニットパターンを繰り返すからそれが回折格子となるのである。対象物 (像面) において格子点へだけ回折することになる。回折点はある単位量の整数倍となる。それは高速フーリエ変換 (FFT) による計算を可能にする。FFT の使用は DOE 回折像の計算が迅速であって設計が容易になるという極めて好都合の利点がある。

【0014】

それに多数のスポットに穴を開けるという場合は、それは縦横に等間隔で並列する格子点に穿孔することが多い。例えばプリント基板に縦横等間隔に穴を開けるといような場合である。

【0015】

格子点に穴を開けるということはユニットパターンを縦横に並べたもののフーリエ変換に対応しており、それがふさわしいものであったのである。但し厳密にはユニットパターンの回折光は回折角の正弦 (\sin) がある値の定数倍となるのであるから $f \sin \theta$ レンズと組み合わせる事によって初めてプリント基板上に等間隔の格子点を穿孔することができる。しかもそれは高速フーリエ変換 (FFT) によって計算機によって短時間に自動的に計算することができる。

【0016】

【発明が解決しようとする課題】

そのようなユニットパターンの繰り返しによる回折型光学部品 (DOE) はしかし反面次のような難点がある。

【0017】

(1) ユニットパターン Γ の繰り返しになるDOEは、分岐ビームの進行方向を規則的な格子点上にしか決めることができない。ユニットパターンのサイズを大きくすること、レーザ波長 λ を小さくすることによって格子のピッチを小さくすることは可能である。しかしレーザ波長はレーザが決まれば決まってしまう。波長を短くするにはレーザを変えるしかない。

【0018】

しかし十分なパワーの取れる使い易いレーザは炭酸ガスレーザやYAGレーザしかない。また、レーザは対象とする材料と加工の種類に適合するものが選択されなければならないので、なるべく波長は動かしたくない。となれば穴開け対象の格子点の間隔(ピッチ)を狭くするにはユニットパターンサイズを大きくするしかない。

【0019】

ユニットパターン Γ のサイズを Λ ($\Lambda = aP$ または bQ)として、レーザ波長を λ とし、ビームの番号を j として、 j 番目のビームの回折の次数を m_j とし、回折角を α_j とすると、ブラッグ(Bragg)の回折条件式

【0020】

$$\Lambda \sin \alpha_j = m_j \lambda \quad (1)$$

【0021】

が成り立つ。回折の次数 m_j は正負の整数(0、 ± 1 、 $\pm 2 \dots$)である。左辺は隣接ユニットパターンの対応点から α_j で傾斜しているある面までの距離の差であり、それが波長の整数倍になるよう回折されるというのが右辺の条件である。 m_j 次数の回折光は α_j の方向へ回折されることになる。

【0022】

だから $f \sin \theta$ レンズがあれば回折ビームはプリント基板などの被加工物面上において等間隔の格子点に集光する。被加工物面上の格子点は被加工物面の原点に対して $f \sin \alpha_j$ の点となる。

だから被加工物面での等間隔格子点のピッチ p は

【0023】

$$p = f \lambda / \Lambda \quad (2)$$

【0024】

ということになる ($\Lambda = aP$ または bQ : ユニットパターン寸法)。微細加工のため、それを小さくしたいという要望がある。ピッチ p を減らすためにはユニットパターンの1辺の寸法 Λ を大きくすればよい。

【0025】

しかしそれは限界がある。DOEのサイズを超えることができないのは当然であるが、ユニットパターンが縦横にいくつか存在しないと所望の回折特性とならないのであるから、DOE寸法をユニットパターン寸法で割った値はかなり大きい整数ということになる。DOE全体の寸法はレーザービームの広がりによって制限される。それがユニットパターンの寸法 Λ を制限する。そうすると被加工物面での格子点のピッチ p は下限があり、それ以上小さくできない。それが一つの欠点である。

【0026】

(2) ユニットパターンを繰り返す回折型光学部品 (DOE) を用いたレーザー加工装置では、像面 (被処理物の加工面) で規則的な格子点位置にしかスポット (光点) を位置させることができない。電子部品で要求される高精度のスポット配置を実現することは難しい。先述のように $f \sin \theta$ レンズを用いた場合で α_j の方向に回折されたビームは

【0027】

$$f \sin \alpha_j = m_j \lambda f / \Lambda \quad (3)$$

【0028】

の点 (格子点; つまり m_j が整数) に結像する。だからそれ以外の点にレーザービームを集光するようにはできない。

【0029】

ユニットパターンを繰り返す従来の回折型光学部品 (DOE) を図1によって説明する。図1の左側はDOEとユニットパターンを示す。最小単位のセルCの寸法は $a \times b$ である。横P個、縦Q個のセルが集まったものがユニットパターンYである。横G、縦Hのユニットパターンが集まったものがDOEである。

【0030】

つまり PQ 個のセルが一つのユニットパターン Υ を形成し、 GH 個のユニットパターンが一つの DOE を形成する。 DOE は $PQGH$ のセルを含むが、 GH のユニットパターンは同一だからセルの自由度は結局 PQ しかない。

【0031】

DOE に平面波が導入されるとユニットパターン Υ が回折格子となるから先ほどのブラッグ回折の式に従う方向に回折される。横方向の回折の次数を p で縦方向の回折の次数を q で表現する。回折光の方向は横に P 個、縦に Q 個である。図 1 の右側において対象物面での格子あるいは回折光の方向を $P \times Q$ で表す。 PQ 個の対象物 T (被照射面; 像面) での格子点 m_j を次数 (p, q) で表す。ユニットパターン中心に原点をとるので $-P/2 \leq p \leq P/2$ 、 $-Q/2 \leq q \leq Q/2$ である。

【0032】

DOE 側では、一つのユニットパターン Υ での PQ 個のセルを区別するために m, n という番号を付ける。 x 座標が m 、 y 座標が n である。ユニットパターン Υ でも中心を原点にするので、 $-P/2 \leq m \leq P/2$ 、 $-Q/2 \leq n \leq Q/2$ である。 m, n 番目のセル (画素) がもつパラメータは複素振幅透過率 t_{mn} である。透過率というのが実際には位相 ϕ_{mn} が重要であり透過率の絶対値は 1 というようにしている。その厚み部分を通過するときの基準厚み通過時との位相の差 $\Delta \phi_{mn}$ として与えられる。

【0033】

DOE の屈折率を n とする。位相差 $\Delta \phi = 2\pi \Delta d (n-1) / \lambda = k \Delta d (n-1)$ によって厚みの差 Δd と関係付けられる。 Δd は $g = 2^s$ (s は整数) 通りの値をもつ。だから位相差 $\Delta \phi_{mn}$ 、複素振幅透過率 $t_{mn} = \exp(j \Delta \phi_{mn})$ も $g = 2^s$ 通りの値をもつ。

【0034】

図 1 では簡単にセルを白黒で示すが、上記のように 2 値である必要はなく 2^s 値である。図 1 において回折光が被加工物面 T (像面) の格子点に点集光する。格子点の座標が p, q である。格子点というのは縦横の線が直交する点である。

回折ビームは必ず格子点に局在する。非格子点を回折ビームは通らない。

【0035】

格子点という言葉はこれからも度々用いるが、像面Tの格子という意味でもあり像面に投影する前の回折角空間でも格子点という使い方をする。回折角空間の格子点を通る回折ビームは像面Tの格子点に集光されるビームである。格子点位置は式(2)、(3)で厳密に与えられる。

【0036】

DOEから(p, q)方向に進行する回折光の振幅 W_{pq} は次のように求められる。被加工物面での格子点座標(p, q)と、DOEでの回折次数(p, q)は一対一に対応する。DOEにおける画素の複素透過率 t_{mn} のフーリエ変換が、(p, q)方向の回折光の振幅 W_{pq} となる。つまり $|W_{pq}|^2$ は被加工物面での格子点(p, q)での回折光強度となる。それは

【0037】

【数2】

$$W_{pq} = \text{sinc}\left(\frac{p}{P}\right) \text{sinc}\left(\frac{q}{Q}\right) \sum_m \sum_n t_{mn} \exp\left\{-2\pi j \left(\frac{mp}{P} + \frac{nq}{Q}\right)\right\} \quad (4)$$

【0038】

によって与えられる。非常に簡明な式であり計算しやすい形をしている。この式については後に説明する。(m, n)はDOE全体でなく、一つのユニットパターンγだけで積算する。PQH個でなく、PQ個の積算である。この式では明確にわからないが格子点以外の点では回折光強度は0である。つまりp, qが整数である方位にしか回折が起こらない、対象物(被加工物面)では格子点(p, q)の上には回折光が来ないということである。だから W_{pq} はp, qが整数である格子点上だけで計算すれば良いのである。

【0039】

その中間の非整数の部分は初めから0だとわかっているから計算の必要がない(実際に式(4)を非整数に対し計算すると0になるという意味ではなくて、ユニットパターンが繰り返されるという仮定により、非整数の部分は0または無視

できる程に小さい値をとることが証明できるといった方が正確である)。

【0040】

上に出てくるシンク関数というのは $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x) / \pi x$ によって定義される。これは、DOEが矩形のセルを並べた構造よりなることで高次の回折光の強度が低減される効果を意味する。

【0041】

t_{mn} を与えておき、2重和の部分でFFTで計算する。それは $\exp()$ の中に入っているパラメータ p, q が整数だから可能なのである。 p, q は(1)式の回折次数 m_j に対応し必ず整数である。FFTは、フーリエ変換される関数がサンプリングにより離散化されている場合に適応でき、フーリエ変換後の関数も対応するサンプリング間隔で離散化される。式(4)では振幅透過率 t_{mn} が離散化されており、それに対応して W_{pq} も離散的であるのでFFTが計算可能である。

【0042】

DOE側でのパラメータ (m, n) の数は PQ であり像面側でのパラメータ (p, q) の数も PQ である。複素振幅の絶対値の二乗したものが (p, q) 方向の強度 $I(p, q)$ を与える。

【0043】

$$I(p, q) = |W_{pq}|^2 \quad (5)$$

【0044】

像面には予め所望のパターン T を想定しておき、そのパターンを実現するための t_{mn} を仮定し、上の計算をして $I(p, q)$ が初めに与えたパターン T を与えるかどうかを調べる。いくつかの解の組 $\{t_{mn}\}$ が得られるが評価関数によって最適と思われるものを選び出す。

【0045】

従来例のDOEによるビーム分岐の角度分解能を U_1, V_1 とする。DOEからみて、像面上の隣接する格子点長を見込む角度が必要な角度分解能である。DOEと像面の距離を L 、像面格子の単位長さを e とすると必要角度分解能は e/L である。ブラッグ回折条件は $\sin \alpha = m\lambda / \Lambda$ であるが、 $\Delta(\sin \alpha) =$

e/L なので、 $e/L = \lambda/\Lambda$ となる。つまり必要な角度分解能 U_1 、 V_1 はユニットパターンの寸法 Λ (横 aP または縦 bQ) で波長 λ を割ったものである。

【0046】

$$U_1 = \lambda / aP \quad (6)$$

$$V_1 = \lambda / bQ \quad (7)$$

【0047】

DOEは $G \times H$ 個のユニットパターンの集合である。DOEの横寸法は $aGP = aR$ であり、縦寸法は $bHQ = bS$ である。従来法によるDOEの場合その角度分解能 U_1 、 V_1 は、波長 λ をDOE寸法 (aR または bS) で割った角度よりも小さくできない。つまり分解能 (最小弁別角という意味で) が荒すぎるということである。

【0048】

$$U_1 > \lambda / aR \quad (8)$$

$$V_1 > \lambda / bS \quad (9)$$

【0049】

それは格子点にしか回折光を与えることができないということである。格子点からずれた点に回折光を照射できないし、格子状のパターンしか対象にできないということである。それはDOEの用途を著しく限定することになる。

【0050】

(4) 式の導出について簡単に述べる。波動光学はDOE上の点 (x , y) の光が像面の点 (X , Y) にいたる光の位相を含む振幅を足し合わせて像面の振幅を求める。近似式は $\exp()$ の中に

【0051】

$$k(xX + yY) / L \quad (10)$$

【0052】

というような部分を含む。 L はDOE・像面の距離である。DOEのセルサイズは $a \times b$ であるので、

【0053】

$$x = ma, \quad y = nb \quad (11)$$

【0054】

である。像面での距離は格子間隔が e であり、 p 、 q という整数によって横縦に番号付けられているのだから、

【0055】

$$X = p e, Y = q e \quad (12)$$

【0056】

である。それらを (10) に入れると、

【0057】

$$k (m a p e + n b q e) / L \quad (13)$$

【0058】

となる。 e/L は DOE から像面の格子長を見込む角度であり、次数が一つ違う回折角の差に等しい。 Δ を差分の記号として、ブラッグ回折の条件は $e/L = \Delta (\sin \alpha) = \Delta m_j \lambda / \Lambda = \lambda / \Lambda$ であり、 $k = 2\pi / \lambda$ 、 $\Lambda = P a$ 、 $Q b$ なので式 (13) は、

【0059】

$$(2\pi / \lambda) (m a p + n b q) \lambda / \Lambda = 2\pi (m p / P + n q / Q) \quad (14)$$

となる。それが式 (4) の $\exp()$ の中へ入っている。 m 、 p は $-P/2 \sim +P/2$ の整数、 n 、 q は $-Q/2 \sim +Q/2$ の整数であるから (4) のような $\exp()$ の内容をもつ式は FFT で短時間で簡単に計算できる。

【0060】

【課題を解決するための手段】

本願発明は、ユニットパターンが存在せずセルの全てへ自由に t_{mn} を与えることができるものとし全セルに複素透過率 t_{mn} を与え、高速フーリエ変換 (FFT) を用いないで回折積分式、

【0061】

【数3】

$$W(\alpha, \beta) = \text{sinc}\left(\frac{a\alpha}{\lambda}\right) \text{sinc}\left(\frac{b\beta}{\lambda}\right) \sum_m \sum_n t_{mn} \exp\{-jk(ma\alpha + nb\beta)\} \quad (15)$$

【0062】

を直接計算することによって、非格子点を含む所望の角度へ分岐されるビームの強度を算出することにした。(4)式と似ているが実はかなり違う。 m 、 n の和はユニットパターン内でなく全DOEのセルに対するものである。だからそれだけで計算量がGH倍になっている。

【0063】

それだけではない。格子点だとパラメータが整数 p 、 q になるが必ずしも格子点にならないから連続量である回折角 α 、 β を変数として採用している。 α 、 β は整数でないからFFTを使うことができない。だから実際の計算をするしかない。

【0064】

それとともに、設計の自由度も著しく増加しているのである。非格子点にビームを分配できるし角度分解能を上げることもできる。しかし、所望回折点(α 、 β)の数はK個であって、それは増えるわけではないが、FFTが使えないし、一つ一つの式が含む項の数はHG倍になっており、それだけ計算に時間がかかる。計算に時間がかかるだけでなく初期条件や修正条件として $\{t_{mn}\}$ を与えるのにも時間がかかる。

【0065】

上の式を計算するのは時間がかかるので所望回折点(α_k 、 β_k)での回折光量を計算するときは使うが(本来0であるべき)ノイズの計算のときは高速フーリエ変換を用いる。だから積分式の直接計算と高速フーリエ変換が併用されるのであって、高速フーリエ変換(FFT)を全面的に排除するのではない。しかし回折強度を正確に計算するための主な計算ではFFTを使わない。

【0066】

図2によって本発明の手法のあらましを述べる。回折型光学部品DOEはユニットパターンの繰り返しでなく横R個、縦S個の画素よりなるものである。つまり従来は画素—ユニットパターン—DOEの3段階の構成であったが、中間のユニットパターンを欠落しているのである。最小単位の画素と全体のDOEの2段階構成である。

【0067】

最小単位である一つの画素は g 段階の厚みの種類を持っている。 $g = 2, 4, 8, 16, 32, \dots 2^s$ ($s = 1, 2, 3, \dots$) である。DOEからの回折光に含まれる α 、 β 方向の分岐ビーム強度を $W(\alpha, \beta)$ とする。それを DOE の振幅透過率 t_{mn} のフーリエ変換として求める。ユニットパターンが存在しないから $\pm n$ 次回折というような概念はもはや存在しない。DOEからの回折光による強度分布の角度依存性はフーリエ変換によって計算できる (FFT は使えない) から、その計算を実際に行って α 、 β 方向の複素振幅を求める。

【0068】

【数4】

$$W(\alpha, \beta) = \text{sinc}\left(\frac{a\alpha}{\lambda}\right) \text{sinc}\left(\frac{b\beta}{\lambda}\right) \sum_m \sum_n t_{mn} \exp\{-jk(ma\alpha + nb\beta)\} \quad (16)$$

【0069】

という式を計算する。 k は波数 $2\pi/\lambda$ である。(4) 式と違うのは方位を表現する α 、 β が格子点に対応する整数 p 、 q とは限らないということである。 α 、 β は実数である。もし整数を取れば、被加工物面で格子点 p 、 q に対応することになり (4) 式と同じになる。

【0070】

しかし単にパラメータが整数 p 、 q から実数 α 、 β になったというのではなくて、非格子点に対応する角度も許容するということである。また mn の積算はユニットパターン内 ($P \times Q$) でなくて全 DOE ($R \times S = PQGH$) で行う。

【0071】

複素振幅を二乗すると強度分布 $I(\alpha, \beta)$ が求められる。

【0072】

$$I(\alpha, \beta) = |W(\alpha, \beta)|^2 \quad (17)$$

【0073】

分岐ビームの数を K とする。それは目的によって決まる有限の数である。 K 本の分岐ビームに付ける番号を $k = 1, 2, \dots, K$ とする。 k 番目の分岐ビームの傾斜角は α_k 、 β_k である。

【0074】

本願発明のDOEの設計においては、従来設計のように各分岐ビームの角度をある定まった角度分解能 U_1 、 V_1 （すなわち λ/Λ ）の整数倍とする必要はない。が、やはり必要な角度分解能 U_2 、 V_2 を定義できる。十分に小さな正の定数 U_2 と、 V_2 と適当な（正負の）整数 m_k 、 n_k を適宜選択する事により、各分岐ビームの角度（ α_k 、 β_k ）を従来設計と同じように、

【0075】

$$\sin \alpha_k = m_k U_2 \quad (18)$$

$$\sin \beta_k = n_k V_2 \quad (19)$$

【0076】

と表すことが可能である。 k 個の整数群 $\{m_k\}$ は公約数をもたず互いに素であるとする。また、 k 個の群 $\{n_k\}$ も公約数を持たず互いに素である。つまり x 方向回折角の正弦の群 $\{\sin \alpha_k\}$ の最大公約数が必要な角度分解能 U_2 、 y 方向回折角の正弦の群 $\{\sin \beta_k\}$ の最大公約数が必要な角度分解能 V_2 を与えるのである。

【0077】

回折角正弦群 $\{\sin \alpha_k\}$ も $\{\sin \beta_k\}$ も整数でないから最大公約数というのはなにやらおかしいような気がするが実数だからやはり定義可能である。

【0078】

ここで公約数というのは、 k 個の $\{\sin \alpha_k\}$ を割り切れる数だということである。最大公約数というのはその内最大のものという意味である。最大公約数にあたる角度が必要な角度分解能である。

【0079】

角度 U_2 、 V_2 が十分に小さくないと $|\sin \alpha_k - \sin \alpha_{k'}| < U_2$ や $|\sin \beta_k - \sin \beta_{k'}| < V_2$ となり、区別が付かない。そのような区別が付かないといけないので、必要な分解能が式（18）、（19）で求められるのである。

【0080】

DOE全体のパターンは $R \times S$ のセルからなっているのでDOEの全寸法は a

R、b Sである。全てのセルRSへ自由に t_{mn} を与えることができるので、角度分解能 U_2 、 V_2 を $U_2 < \lambda / a R$ 、 $V_2 < \lambda / b S$ とすることができる。

【0081】

ここで、 U_2 、 V_2 は従来設計での角度分解能 $U_1 = \lambda / a P$ 、 $V_1 = \lambda / b Q$ とは全く異なるものである。それよりもずっと小さい値を取る。

【0082】

本発明の特徴はDOEにユニットパターン Υ がなくて全セルCが自由パラメータとなるということである。自由パラメータになるから分岐ビームの方位が自由化される。自由に設定できて好都合であるがセルの規則性がなくなり従来の回折次数という概念がなくなる。

【0083】

回折次数がない場合でも、分岐ビームの回折角の相違の最小を弁別できるのでなければならない。それを $U_2 < \lambda / a R$ 、 $V_2 < \lambda / b S$ というように定義した。

【0084】

それはユニットパターン Λ で決まる従来例の分解能 U_1 、 $V_1 (= \lambda / \Lambda)$ とは違い格段に小さい値である。パラメータが増え、計算量が増えたために分解能を著しく上げることができるのである。

【0085】

だから定義に多様性があり、DOEを構成する全て(RS個=PQGH個)のセルの t_{mn} を自由に与えるというのが本発明の特徴であるといえる。また同じことであるが角度分解能が $U_2 < \lambda / a R$ 、 $V_2 < \lambda / b S$ であるというようにも定義できる。この定義は分かりにくいが数学的には検証が容易である。

【0086】

あるいは回折像の格子点p、qだけでなく格子点の間の適当な非格子点を計算するというのも同義である。しかしその定義は回折像や、回折像の格子点などを定義しなければならず簡単でない。

【0087】

あるいはDOEに同一パターンを繰り返すユニットパターンがないというよう

にも本発明を定義できる。だから本発明のDOEはユニットパターンを欠落するDOEと定義してもよい。しかしそれは消極的な定義であって疑義をもたらし易いという欠点がある。

【0088】

そのように本発明のDOEはユニットパターンがなくFFT（高速フーリエ変換）を用いず画素一つ一つの寄与を積算し任意の分岐角度 α 、 β の複素振幅 $W(\alpha, \beta)$ を求める。それは時間がかかることであるが分解能を上げることができる。ユニットパターンがあると角度分解能が λ/Δ であったが、本発明はユニットパターンがないからもっと小さい角度分解能を得ることができる。

【0089】

従来例において、ユニットパターンの回折像は規則正しく縦横に配列した格子となり、それ以外の不規則パターンを生じることはできない。

【0090】

本発明はユニットパターンのないDOEを設計、作製するのでどのような回折像でも得ることができる。回折ビームのスポットが非格子点にあってもよい。回折ビームの数は K で有限であり、ディスクリットではあるが位置が格子点にないということである。

【0091】

そうはいうものの、回折ビームが実際に非格子点にくるのか、回折ビームの数は幾つなのか、角度分解能 U_2 、 V_2 は幾らなのか？などというのは $\{t_{mn}\}$ によるのである。 $\{t_{mn}\}$ によるから、そのような定義は無駄かということそうではない。

【0092】

本発明の手法のようにユニットパターンがなくて全セルについてフーリエ変換を実際に計算する方法は時間がかかるのであるが、 $\{t_{mn}\}$ を適当に選べば、非格子点に回折ビームをもってくることはできるし、分解能を $U_2 < \lambda/aR$ 、 $V_2 < \lambda/bS$ というようにすることもできるのである。

【0093】

従来のユニットパターンを用いる方法は如何に $\{t_{mn}\}$ を選んでも非格子点

に回折ビームを位置させることはできないし、如何に $\{t_{mn}\}$ を選んでも角度分解能を $U_1 < \lambda/aR$ 、 $V_1 < \lambda/bS$ とすることはできない。

【0094】

難しいことであるが、そういうことである。

【0095】

ユニットパターンを用いずDOEの全てのセルを自由パラメータとする本発明はだから規則正しく格子状に配列していないような任意の配列の任意の数の分岐ビームを得ることができる。

【0096】

本発明によれば、任意の位置に高い位置精度でレーザビームを多点一括照射することが可能となる。電子部品で要求される自由かつ高精度なスポット配置を実現することができる。レーザ加工の高速化、コスト低減に大きな効果がある。

【0097】

【発明の実施の形態】

上記の任意角度の分岐強度計算を用いることによってDOEのパターンを最適化設計することが可能である。様々の最適化手法を選択できるが、ここでは、例えば、従来設計（（1）特開2000-231012号）と同様にDirect Binary Search (DBS) 法を用いることとする。

【0098】

DBS法では、DOEの特性を判定する評価関数を用いる。セルの位相（透過振幅率）を変更して評価関数の値の増減を判定する事によって、評価関数が最小化されるように全セルの位相すなわちDOEのパターンを最適化する。

【0099】

上記のように式（16）の計算から、K個の分岐ビームの強度 $I(\alpha, \beta) = |W(\alpha, \beta)|^2$ を算出することが可能である。そこで例えば次のような評価関数Eを用いて解（セルの位相または振幅透過率の集合）を評価することができる。

【0100】

【数5】

$$E = W_1 \left(\eta_0 - \sum_k I(\alpha_k, \beta_k) \right)^2 + W_2 \sum_k \left(I(\alpha_k, \beta_k) - \bar{I} \right)^2 \quad (20)$$

【0101】

ここで η_0 は回折効率の目標値、 \bar{I} （上線付きの I ）は $I(\alpha, \beta)$ の平均値、 W_1 、 W_2 は各項の重み係数である。評価関数 E を最小化すると、右辺第1項は K 個の分岐強度の和すなわち回折効率を高くするように働き、右辺第2項は分岐強度の均一性を向上させるように働く。これにより、所望の角度にビームを分岐し高い回折効率と分岐強度均一性を有する DOE パターンを設計することができる。

【0102】

式(20)はノイズとして現れる分岐ビームの低減を考慮に入れていない。そのため望まない分岐角度に強度の強いノイズを発生させる可能性がある。そこで前記の例と同じように(16)式によってノイズを計算したいところであるが、どこに現れるか分からないノイズの角度 (α, β) を予め特定することができない。また多数の角度を指定した計算を繰り返すことは計算量が大きくなるため、最適化計算の長時間化を招く結果となる。だから事実上実施は難しい。

【0103】

一方従来の設計の場合、FFTでは1回の計算でノイズも含めた $P \times Q$ のスペクトル（分岐強度の分布）を計算するので、それを用いてノイズを評価できるという利点がある。

【0104】

そこで本願発明では、ノイズ計算に限ってFFTを利用する。だから(4)式のような格子点でのノイズ計算となる。 $R \times S$ のセル配列よりなる振幅透過率パターンについてFFTで計算された離散的な角度スペクトルを強度 I_{rs} とする。分岐ビームの角度 (α_k, β_k) に近い角度の強度は高い値を取る可能性がある。それを除いたものを I'_{rs} とする。

例えば式(20)の代わりに

【0105】

【数6】

$$E = W_1 \left(\eta_0 - \sum_k I(\alpha_k, \beta_k) \right)^2 + W_2 \sum_k \left(I(\alpha_k, \beta_k) - \bar{I} \right)^2 + W_3 \text{Max}_{r,s} (I'_{rs})^2 \quad (21)$$

【0106】

を用いることにすれば、右辺第3項によりノイズ強度の最大値を低減することができる（ W_3 は重み係数）。ノイズ計算については高速フーリエ変換FFTを用いるので計算されたスペクトルの角度分解能は $U_3 = \lambda / aR$ 、 $V_3 = \lambda / bS$ によって制限される。

【0107】

本発明のDOEはFFTを用いない設計であるため、前記分解能 U_3 、 V_3 以下の局所領域にノイズが含まれる可能性を含んでいる。そのようなノイズを検出するための方法として次の二つの方法がある。

【0108】

[ノイズ検出法(1)]

$R \times S$ のパターンの周囲に $t_{mn} = 0$ の領域を追加し、計算領域を $R' \times S'$ ($R' > R$, $S' > S$)に拡大する。それによって、FFTによる角度スペクトル計算の角度分解能を $U_3' = \lambda / aR' < U_3$ 、 $V_3' = \lambda / bS' < V_3$ というように高くできる。だから局在するノイズの検出を容易にする。

【0109】

[ノイズ検出法(2)]

式(16)では入射ビームの強度分布の情報を含んでいないが、入射ビーム強度分布を入れた設計とすることもできる。その場合

【0110】

【数7】

$$W(\alpha, \beta) = \text{sinc}\left(\frac{a\alpha}{\lambda}\right) \text{sinc}\left(\frac{b\beta}{\lambda}\right) \sum_m \sum_n a_{mn} t_{mn} \exp\{-jk(ma\alpha + nb\beta)\} \quad (22)$$

【0111】

というようにすればよい。ここで a_{mn} は入射ビームの複素振幅分布である。入

射ビームの強度変換は連続量であり本来は $a(\alpha, \beta)$ と書くべきだが t_{mn} に合わせて離散化し a_{mn} としている。

【0112】

例えば入射ビームを $1/e^2$ 直径が $aR/2$ のガウス振幅分布とすると、角度スペクトル上でのスポットの直径は $8\lambda/\pi aR = 8U_3/\pi$ となり、分解能 U_3 の2倍を越える大きさである。ノイズのスポットも同じ大きさをもつので、このようにすれば角度分解能の制約があってもFFTでのノイズ検出が容易になる。

【0113】

式(16)は角度スペクトル、すなわち遠視野像(フラウンホーファー像)であるので上記により設計されるDOEは無限の焦点距離を有するフーリエ型(フラウンホーファー型)のDOEとなる。

【0114】

このフーリエ型DOEのパターンに焦点距離 f のレンズが有するパターンを積算することによって、有限の焦点距離を有するフレネル型のDOEのパターンを得ることができる。パターンの積算に当たってはフーリエ型DOEパターンとレンズのパターンのセルサイズを同一としておく必要がある。

【0115】

短い焦点距離のレンズのパターンは微細なセルサイズを必要とするので、その場合は、予めフーリエ型パターンを分割($a' = a/C_1$ 、 $b' = b/C_2$ となる。ここで C_1 、 C_2 は2以上の整数である。)しておき、そのセルサイズでレンズのパターンを作製して積算する。そうすることによってフレネル型のDOEを設計、製造することができる。

【0116】

フレネル型DOEを用いるとDOEの表面構造の微細加工エラー(例えば段差エラー)の影響を低減することができ、特に0次光($\alpha = \beta = 0$)の強度変動を低減する効果がある((2)特許第3346374号に詳しい記述あり)。但しフレネル型DOEの設計方法は従来例(2)の手法とは違う。この発明の手法(レンズのフーリエ変換パターンを係数に与え積算する)のDOEでもフレネル型

のDOEとなる。

【0117】

【実施例】

[実施例1 (フラウンホーファー型 (フーリエ型) DOE、小分岐角)]

[A. DOEの主な仕様]

波長: $10.6 \mu\text{m}$

モード: TEM₀₀

$1/e^2$ ビーム直径: 10 mm

DOE位相: 16段階

DOEセルサイズ: $a = 20 \mu\text{m}$ 、 $b = 20 \mu\text{m}$

DOE全セル数: $R = 1000$ セル、 $S = 1000$ セル

DOEサイズ: $aR = 20 \text{ mm}$ 、 $bS = 20 \text{ mm}$

分岐ビーム数: 49 ($= 7 \times 7$)

分岐パターン: 図3の通り、 $P_1 = 3.93701 \text{ mrad}$ 、 $P_2 = 3.93701 \text{ mrad}$ 、 $\delta_1 = 0.15748 \text{ mrad}$ 、 $\delta_2 = 0.07874 \text{ mrad}$
ここでradはラジアン ($1 \text{ ラジアン} = 57.29^\circ$)、mradはミリラジアン ($1 \text{ mrad} = 3.437 \text{ 分}$) である。

【0118】

分岐角度を $\sin \alpha_k = m_k U$ 、 $\sin \beta_k = n_k V$ と表現すると、この実施例では、 $U = \delta_1 = 0.15748 \text{ mrad}$ 、 $V = \delta_2 = 0.07874 \text{ mrad}$ となる。 $\lambda/aS = \lambda/bS = 0.53 \text{ mrad}$ であるから、 $U < \lambda/aR$ 、 $V < \lambda/bS$ という条件を満足している。

【0119】

[B. 設計結果]

回折効率 82.2%、強度ばらつき (標準偏差) 1.6%、最大ノイズ強度 3.6%、入射ビームの強度分布、DOEパターン及び像面強度分布を図4～6に示す。

【0120】

[C. レーザ加工装置]

上記のDOEと、平凸レンズ（焦点距離127mm、直径50.8mm、ZnSe製）を用いたレーザ加工装置を作製した。像面のスポット直径は $171\mu\text{m}$ ϕ とした。

【0121】

目的となるスポットの配列は図3の通りである。横軸は角度 α であり、縦軸は角度 β である。対象物面に投影したものではないということに注意すべきである。7×7=49のスポットが縦横に並んでいるが直線上でなく曲線上に並ぶ。

【0122】

(±2, ±2)の4点と(±2, 0)、(0, ±2)の4点と(0, 0)点は9点は格子点にあるが、その他の点は格子点からずれている。そのように縦横列が柔らかに波打つようなスポットが目的となるパターンである。

【0123】

寸法は $P_1 = 500\mu\text{m}$ 、 $P_2 = 500\mu\text{m}$ であり格子は $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ の大きさである。(±4, ±4)の近傍の点は左廻り方向にずれている。(+4, +4)の近傍の点の格子点からのズレは横が $\delta_1 = 20\mu\text{m}$ 、縦が $\delta_2 = 10\mu\text{m}$ である。だから、ズレは小さいがズレをわざわざ与えたということが重要なので図3では誇張して描いている。その他の点も格子点から同じ δ_1 、 δ_2 でずれている。与えたズレが δ_1 、 δ_2 であるから必要な分解能 U_3 、 V_3 はそれより短いことが要求される。

【0124】

そのように非格子点にドットを並べるような分岐ビームは同一ユニットパターンの繰り返しである通常のDOEでは作り出すことができない。本発明によらなければならない。

【0125】

図4は入射ビームの空間的な強度分布である。炭酸ガスレーザのビームであり、ここではガウシアンビームとした。

【0126】

図5は本発明の計算法によって設計されたDOEのパターンを示す。同じような模様の繰り返しが見られるようであるが、実際には同じでなくてそれぞれ違う

し大きさ形状も不揃いで同一正方形のユニットパターンというものでない。

【0127】

図6は本発明の計算（全画素の計算）によって設計され製造された図5のDOEによって炭酸ガスレーザビームを分岐させて角度分布を調べたものである。マージンも含む画面の大きさは 39.75 mrad である。格子点の間隔は 5 mrad 程度である。これはズレを誇張していないからわかりにくいだが、縦方向にみると曲線上に並んでいるのが分かる。上から3番目、7番目のスポットが右に偏奇し1番目、5番目が左に偏奇しているのが肉眼でもよく分かる。だから揺らぎのある目的パターン図3の 7×7 を再現している。スポット強度は、ほとんどばらつきはない。

【0128】

[実施例2（フラウンホーファー型（フーリエ型）DOE、大分岐角）]

[A. DOEの主な仕様]

波長： $10.6 \mu\text{m}$

モード： TEM_{00}

$1/e^2$ ビーム直径： 10 mm

DOE位相：16段階

DOEセルサイズ： $a = 20 \mu\text{m}$ 、 $b = 20 \mu\text{m}$

DOE全セル数： $R = 1000$ セル、 $S = 1000$ セル

DOE全サイズ： $aR = 20 \text{ mm}$ 、 $bS = 20 \text{ mm}$

分岐ビーム数： $49 (= 7 \times 7)$

分岐パターン：図3の通り、 $P_1 = 39.37008 \text{ mrad}$ 、 $P_2 = 39.37008 \text{ mrad}$ 、 $\delta_1 = 0.15748 \text{ mrad}$ 、 $\delta_2 = 0.07874 \text{ mrad}$

【0129】

目的とするパターンはこの場合も図3の揺らぎのある 7×7 のドット配列パターンである。目的パターンを同一配列にした方が実施例の間での違いがよく分かるのでそのようにしている。同一といっても大きさは違う。大分岐角の場合の状況を調べるため実施例2では $P_1 = 39.37008 \text{ mrad}$ 、 $P_2 = 39.3$

7008 mradとしている。つまり格子の間隔については実施例1の場合の10倍としている。ズレは実施例1と同じで $\delta_1 = 0.15748 \text{ mrad}$ 、 $\delta_2 = 0.07874 \text{ mrad}$ である。だからズレの相対規模が減っている。

【0130】

実施例2の場合も、x、y方向の分解能U、Vは

$$U = \delta_1 = 0.15748 \text{ mrad}$$

$$V = \delta_2 = 0.07874 \text{ mrad}$$

である。

【0131】

実施例2においても $aR = 20 \text{ mm}$ ($20000 \mu\text{m}$)、 $bS = 20 \text{ mm}$ ($20000 \mu\text{m}$)なので、 $\lambda/aR = \lambda/bS = 0.53 \text{ mrad}$ であり、

【0132】

$$U (0.15748 \text{ mrad}) < \lambda/aR (0.53 \text{ mrad})$$

$$V (0.07874 \text{ mrad}) < \lambda/bS (0.53 \text{ mrad})$$

【0133】

という不等式が成り立つ。

【0134】

[B. 設計結果]

回折効率71.6%、強度バラツキ1.7%、最大ノイズ強度3.5%

DOEのパターンは図7のようである。縦横に細かい格子状の模様ができていることがわかる。格子の中の個々の濃淡の分布は判然としない。図5の実施例1のDOEと比較して全く違っている。回折角の大きい分岐ビームを生じるのだからDOEのパターンは当然に細くなる。

【0135】

ユニットパターンというものは存在しないはずであるが図7は布地の表面のように同じ大きさの編み目が連続しているように見える。予め同一寸法同一形状のユニットパターンを想定しないにも拘らず、このようなよく似た基本形状が縦横に繰り返すようなパターンになる。それは不思議とも思えるが、図8の角度スペクトルを見ればわかるように、本実施例では基本の格子ピッチ P_1 、 P_2 に対し

ズレ δ_1 、 δ_2 は極めて小さいので、パターンが従来のユニットパターンの繰り返しに近く見えるのである。

【0136】

図3のような目的のスポット配置を所望の制約で実現できるDOEは解が一つあるのではなくて無数にある。無数にある解から評価関数を用いて適当なものを選んでいく。評価関数の選び方は先述のように回折効率が多いとか、ある目標値に近いとか、分岐ビーム強度バラツキが少ないとか恣意的な条件を付けて選び出しているのだから、図7の解が唯一であるというのではないし、それが最適だということでもない。

【0137】

それとは全く異なるパターンであっても目的の回折ビーム分布を実現できるものはたくさんある。DOEから目的とする分岐強度分布は一義的な流れであるが、目的の分岐強度分布(図3)からDOEに至る道程は様々なのである。

[C. レーザ加工装置]

上記のDOEと $f \sin \theta$ レンズ(焦点距離127mm)を用いたレーザ加工装置を作製した。像面のスポット直径は $171 \mu\text{m} \phi$ とした。この $f \sin \theta$ レンズは既に述べた本発明者になる従来例(2)特許第3346374号に記載の手法によって製作したレンズである。

【0138】

[実施例3 (フレネル型DOE、小分岐角)]

[A. DOEの主な仕様]

波長: $10.6 \mu\text{m}$

モード: TEM_{00}

$1/e^2$ ビーム直径: 10 mm

DOE位相: 16段階

DOEセルサイズ: $a = 20 \mu\text{m}$ 、 $b = 20 \mu\text{m}$

DOE全セル数: $R = 1000$ セル、 $S = 1000$ セル

DOE全サイズ: $aR = 20 \text{ mm}$ 、 $bS = 20 \text{ mm}$

分岐ビーム数: 49 ($= 7 \times 7$)

【0139】

分岐パターン：図3の通り、 $P_1 = 3.93701 \text{ mrad}$ 、 $P_2 = 3.93701 \text{ mrad}$ 、 $\delta_1 = 0.15748 \text{ mrad}$ 、 $\delta_2 = 0.07874 \text{ mrad}$

【0140】

フレネル型レンズ： 焦点距離 $f = -500 \text{ mm}$

【0141】

実施例1（フラウンホーファー型）と異なるところはDOEがフレネル型であってレンズを兼ねているということである。実施例3で追加すべきレンズは $f = -500 \text{ mm}$ の凹レンズである。もちろん凸レンズを組み合わせることも可能である。

【0142】

実施例3でも（実施例1と同じように）、 $U = \delta_1 = 0.15748 \text{ mrad}$ 、 $V = \delta_2 = 0.07874 \text{ mrad}$ となる。

【0143】

$\lambda/aS = \lambda/bS = 0.53 \text{ mrad}$ であるから、 $U < \lambda/aR$ 、 $V < \lambda/bS$ という条件を満足している。

【0144】

[B. 設計結果]

回折効率 82.2%、強度ばらつき（標準偏差）1.6%、最大ノイズ強度 3.6% である。

【0145】

[C. レーザ加工装置]

上記のDOEと平凸レンズ（焦点距離 127 mm、直径 50.8 mm、ZnSe 製）を用いたレーザ加工装置を作製した。像面のスポット直径は $171 \mu\text{m} \phi$ とした。

【0146】

図9は本発明の計算法によって設計された実施例3のフレネル型DOEのパターンを示す。同心状のパターンが優越して見えるが、それはレンズ成分からくるものである。パターンは不定形であるがサイズがかなり大きいのは目的とする回

折像の広がり小さいからである。

【0147】

[実施例4 (フレネル型DOE、大分岐角)]

[A. DOEの主な仕様]

波長: $10.6 \mu\text{m}$

モード: TEM₀₀

1/e²ビーム直径: 10 mm

DOE位相: 16段階

DOEセルサイズ: $a = 20 \mu\text{m}$ 、 $b = 20 \mu\text{m}$

DOE全セル数: $R = 1000$ セル、 $S = 1000$ セル

DOE全寸法: $aR = 20 \text{ mm}$ 、 $bS = 20 \text{ mm}$

分岐ビーム数: $49 (= 7 \times 7)$

分岐パターン: 図3の通り、 $P_1 = 39.37008 \text{ mrad}$ 、 $P_2 = 39.37008 \text{ mrad}$ 、 $\delta_1 = 0.15748 \text{ mrad}$ 、 $\delta_2 = 0.07874 \text{ mrad}$

【0148】

フレネル型レンズ: 焦点距離 $f = -500 \text{ mm}$

【0149】

目的とするパターンはこの場合も図3の揺らぎのある 7×7 のドット配列パターンである。大分岐角の場合の状況を調べるため実施例4では $P_1 = 39.37008 \text{ mrad}$ 、 $P_2 = 39.37008 \text{ mrad}$ としている。実施例2とそこまでは同一であるが実施例4ではレンズをDOEに結合している。

【0150】

そこが違うのでDOEのパターンは図7 (実施例2) と全く違う。違うのであるが、図7の細かい交差のパターンにレンズの同心パターンを組み合わせたようなパターンとなっており首肯できる結果である。

実施例4の場合も、 x 、 y 方向の分解能 U 、 V は

【0151】

$U = \delta_1 = 0.15748 \text{ mrad}$

$$V = \delta_2 = 0.07874 \text{ mrad}$$

【0152】

である。 $aR = 20 \text{ mm}$ ($20000 \mu\text{m}$)、 $bS = 20 \text{ mm}$ ($20000 \mu\text{m}$)
なので、 $\lambda/aR = \lambda/bS = 0.53 \text{ mrad}$ であり、

【0153】

$$U(0.15748 \text{ mrad}) < \lambda/aR(0.53 \text{ mrad})$$

$$V(0.07874 \text{ mrad}) < \lambda/bS(0.53 \text{ mrad})$$

という不等式が成り立つ。

【0154】

[B. 設計結果]

回折効率 71.6%、強度バラツキ 1.7%、最大ノイズ強度 3.5%

【0155】

[C. レーザ加工装置]

上記のDOEと $f \sin \theta$ レンズ (焦点距離 127 mm) を用いたレーザ加工装置を作製した。像面のスポット直径は $171 \mu\text{m} \phi$ とした。この $f \sin \theta$ レンズは既に述べた本発明者になる従来例 (2) 特許第 3346374 号に記載の手法によって製作したレンズである。

【0156】

図 10 は本発明の計算法によって設計された実施例 4 のフレネル型 DOE のパターンを示す。細かい同心状のパターンが優越して見えるが、それはレンズ成分からくるものである。パターンは不定形であるがサイズがかなり細かいのは目的とする回折像の広がりが大きいためである。それは実施例 2 の図 7 の細かい交差縞模様のパターンに同心のレンズパターンを重畳したものであり、その結果は理解しやすい。

【0157】

【発明の効果】

従来の回折型光学部品 (DOE) というのは一定パターンのユニットパターン Υ を縦横に繰り返し並列させたものであり回折光の方向は離散的で予め決まった方向にしか出ない。DOE の作用はフーリエ変換であるが、ある決まった方向に

しかビームが発生しないことがわかっているのです、それらの方向だけについて回折強度を計算すればよかった。

【0158】

だから高速フーリエ変換によって短時間でDOEの回折光の強度分布を計算できたし設計も容易であった。しかし、それでは縦横に一定ピッチの決まった格子配列した回折スポットしか得られない。格子ピッチはユニットパターンの辺長 Λ で波長 λ を割った値 λ/Λ であり、かなり大きい値となる。それを小さくするにはユニットパターンを大きくしなければならないが、それは限界がある。また規則正しく格子状配列しないもの、格子配列からずれたパターンを作ることができない。

【0159】

本発明はユニットパターンの繰り返しによって全体のDOEを構成するのではなく、個々のセルまで遡ってセル自体に自由度を与えている。ユニットパターンの縦横の数をGHとしたとき、パラメータの数（自由度）が従来のものに比較してGH倍に増えてしまう。それだけでなく回折光の方向が格子点上というように予め決まらない。

【0160】

格子点というような概念もなくなり離散分布から連続分布となり、ディスクリートからアナログへというような大変革をすることになる。

【0161】

回折光強度を計算すべき点の数も飛躍的に増大する。それは不利な点である。高速フーリエ変換の計算法も適用することができない。これも負担になる。必要な点での回折強度をいちいち計算しなければならない。

【0162】

そのような不利な点はあるのであるが、規則格子状でない任意のパターンを回折によって作り出すことができる。つまり任意の形状の回折パターンを得ることができるのである。それに分解能をより細かくすることもできる。回折型光学部品の適用できる範囲を広げている。それとともに回折型光学部品の利用価値をも高めるという優れた効果があるのである。

【0163】

本発明は、任意の位置に高い位置精度でレーザービームを多点一括照射することが可能となる。電子部品で要求される自由かつ高精度なスポット配置を実現することができる。レーザー加工の高速化、コスト低減に大きな効果がある。

【図面の簡単な説明】

【図1】

従来の回折型光学部品において、 $P \times Q$ のセルからなる同一のユニットパターンの繰り返しによってDOEが構成され、自由度は $P \times Q$ であり回折像においては $P \times Q$ の角度格子点だけに回折光が存在し格子点での強度だけが問題でFFTによってDOEから角度格子点での回折強度分布 I_{pq} を計算できるということを示すための従来例の回折型光学部品の説明図。

【図2】

本発明の回折型光学部品においては、同一ユニットパターンの繰り返しというようなことはなくて、 $R \times S$ 個のセルの全てが自由に決定できるパラメータとなり任意の方向へ回折光を出すことができ格子点という概念は存在せず高速フーリエ変換ではDOEから回折強度分布を計算することができず回折積分式を直接に計算する他はないということを示すための本発明の回折型光学部品の説明図。

【図3】

本発明の実施例1～4においてDOEによってビームを分岐回折させる目的となる49分岐ビームの分岐角度配置図。スポットは規則正しい格子点になく、それからいくぶんずれている。分かりやすくするためズレは誇張して書いてある。格子点からのズレ δ_1 、 δ_2 が最低限必要な分解能であり、それは格子点の間隔よりもずっと小さい。従来の方法では分解能は格子間隔だけあればよいのであるが本発明は格子点から微妙にずれた位置にスポットを形成するものだから細かい分解能が必要になり本発明はそのような厳しい要求に応えることができる。

【図4】

実施例1～4で用いた炭酸ガスレーザー入射ビームの強度分布図。強度分布はガウシアンとした。

【図5】

図3の回折パターン ($P_1 = 3.93701 \text{ mrad}$) を作り出すため本発明の実施例1によって設計されたDOEのパターンを示す図。DOEの厚みを白黒の濃淡によって表現している。全く同一のパターンが繰り返しているということではなくてユニットパターンという概念がすでに存在しないことがわかる。

【図6】

図3の回折像を得るため実施例1によって設計されたDOEによって炭酸ガスレーザービームを回折させたときの回折像のビームスポット像。回折像の1辺の寸法は 39.75 mrad である。正確な格子点上でなく彎曲した曲線格子の上にスポットが並ぶ図3のパターンと同じものが再現されていることがわかる。スポットの強度も均一であってパワーが均一であるということもわかる。

【図7】

実施例1を10倍にした図3の目的回折パターン ($P_1 = 39.37008 \text{ mrad}$) を作り出すため本発明の実施例2によって設計されたDOEのパターンを示す図。目的回折パターンが10倍になるのでDOEのパターンは $1/10$ の程度に小さくなる。DOEの厚みを白黒の濃淡によって表現している。

【図8】

図3の目的回折像 ($P_1 = 39.37008 \text{ mrad}$) を作り出すために本発明の実施例2によって設計された図7のDOEによって得られた回折像を示す。回折像の1辺の角度寸法は 331.25 mrad である。実施例1の図6と比べてスポットの揺れが小さいが、それは図3の目的回折像における δ_1 、 δ_2 の P_1 、 P_2 に対する比率が $1/10$ だからである。目的とする回折パターンを再現しているという点では満足のゆくものである。図6に比べ光点のサイズが小さいのは縮尺が約 $1/10$ となっているからである。

【図9】

フラウンホーファー型DOEと集光レンズを結合したフレネル型のDOEによって実施例1のような揺らぎあるスポット群を得るための実施例3のDOEのパターン。つまり実施例1 ($P_1 = 3.93701 \text{ mrad}$) + レンズのDOEのセルの厚み分布を明暗パターンによって示す。ユニットパターンというものは存在しない。それよりも同心状のパターンが優越してみえる。それはレンズを重畳

させたからである。レンズをDOEに重畳するとフレネル型レンズと同じような原理で同心のパターンとなるから、それが全体のパターンを同心形状にしているのである。DOEパターンの繰り返しピッチが荒いのは目的回折像の光点間隔（サイズ）が狭いからである。

【図10】

フラウンホーファー型DOEと集光レンズを結合したフレネル型のDOEによって実施例2のような揺らぎあるスポット群を得るための実施例4のDOEのパターン。つまり実施例2 ($P_1 = 39.37008 \text{ mrad}$) + レンズのDOEのセルの厚み分布を明暗パターンによって示す。ユニットパターンというものは存在しない。それよりも同心状のパターンが優越してみえる。それはレンズを重畳させたからである。レンズをDOEに重畳するとフレネル型レンズと同じような原理で同心のパターンとなるから、それが全体のパターンを同心形状にしているのである。DOEパターンの繰り返しピッチが細かいのは目的回折像の光点間隔（サイズ）が広いからである。

【符号の説明】

C セル（画素）

T ユニットパターン

DOE 回折型光学部品

FFT 高速フーリエ変換

a セルの横寸法

b セルの縦寸法

P ユニットパターンの横方向に並ぶセルの数

Q ユニットパターンの縦方向に並ぶセルの数

p 規則正しく等間隔で並ぶ角度格子点へDOEから回折する光のx方向の回折角を表す次数（離散量、ディスクリート）

q 規則正しく等間隔で並ぶ角度格子点へDOEから回折する光のy方向の回折角を表す次数（離散量、ディスクリート）

W_{pq} DOEからp, q方向に回折される回折光の複素振幅（p, q以外は0）

I_{pq} DOE から p , q 方向に回折される回折光の強度 (p , q 以外は 0)

k 回折ビームの番号

m_k k 番目のビームの回折次数

t_{mn} 横 m 番目、縦 n 番目のセルの振幅透過率

λ レーザ光波長

Λ ユニットパターンの寸法 ($= aP$, bQ)

P ユニットパターンの横辺に並ぶセルの数

Q ユニットパターンの縦辺に並ぶセルの数

α DOE から回折される光の x 方向の回折角 (連続量)

β DOE から回折される光の y 方向の回折角 (連続量)

$W(\alpha, \beta)$ DOE から α , β 方向に回折される回折光の複素振幅 (連続量)

$I(\alpha, \beta)$ DOE から α , β 方向に回折される回折光の強度 (連続量)

U 回折光の x 方向角度分解能

V 回折光の y 方向角度分解能

R DOE の横辺に並ぶセルの数

S DOE の縦辺に並ぶセルの数

G DOE の横辺に並ぶユニットパターンの数 (R/P)

H DOE の縦辺に並ぶユニットパターンの数 (S/Q)

E 評価関数

W_1 , W_2 , W_3 , 評価関数における変化量 2 乗差に掛ける重み

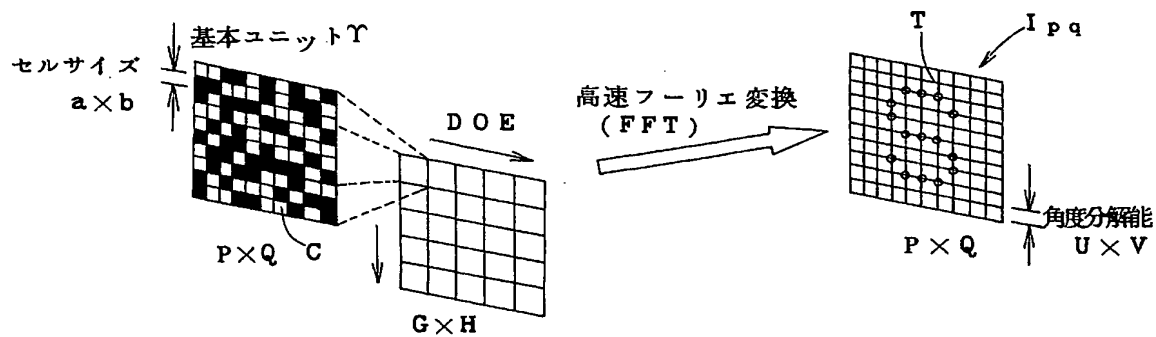
R' $t_{mn} = 0$ の領域を周囲に追加した時の DOE の横辺に並ぶセルの数

S' $t_{mn} = 0$ の領域を周囲に追加した時の DOE の縦辺に並ぶセルの数

【書類名】 図面

【図1】

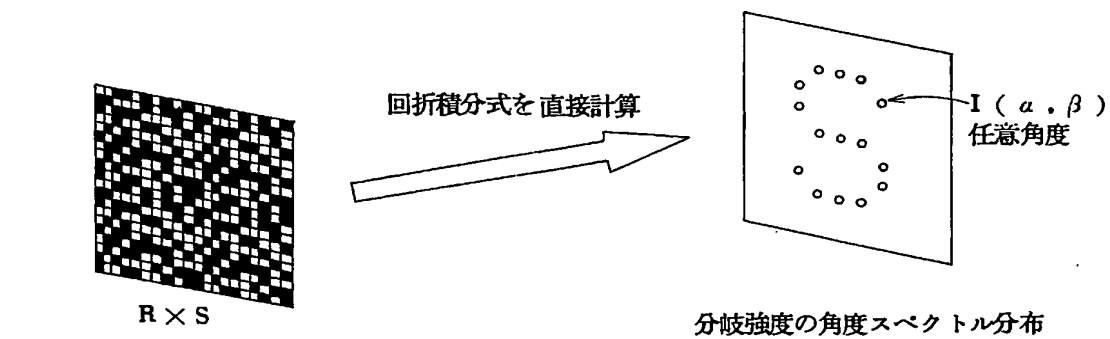
FFTによるDOE設計(従来例)



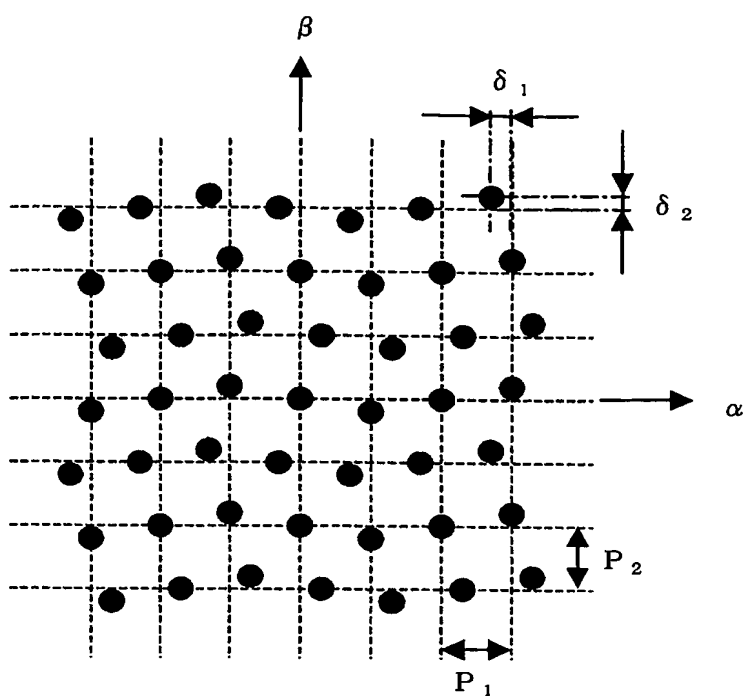
DOEの振幅透過率パターン
(ユニットパターンの繰り返し)

【図2】

DOE設計(本発明)

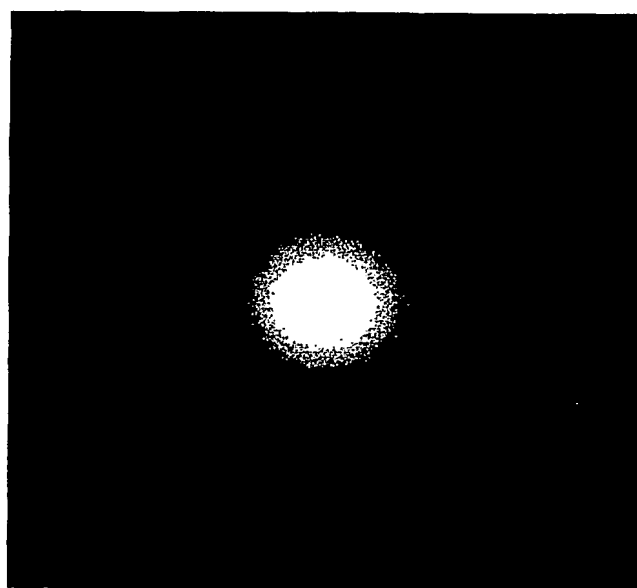


【図3】



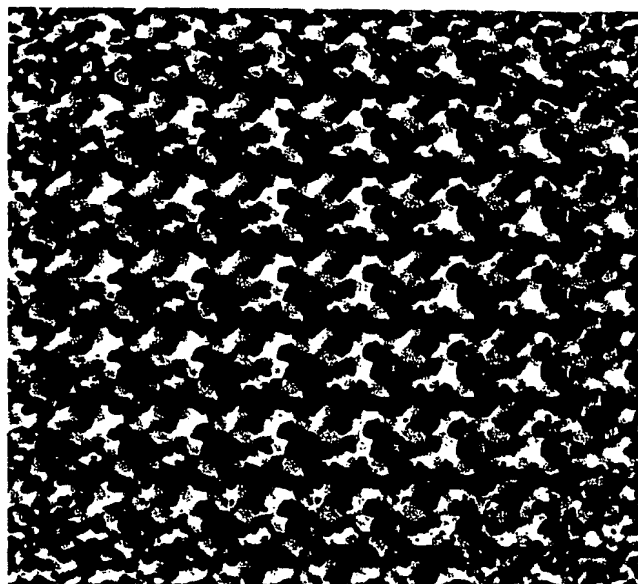
49分岐ビームの分岐角度配置

【図4】



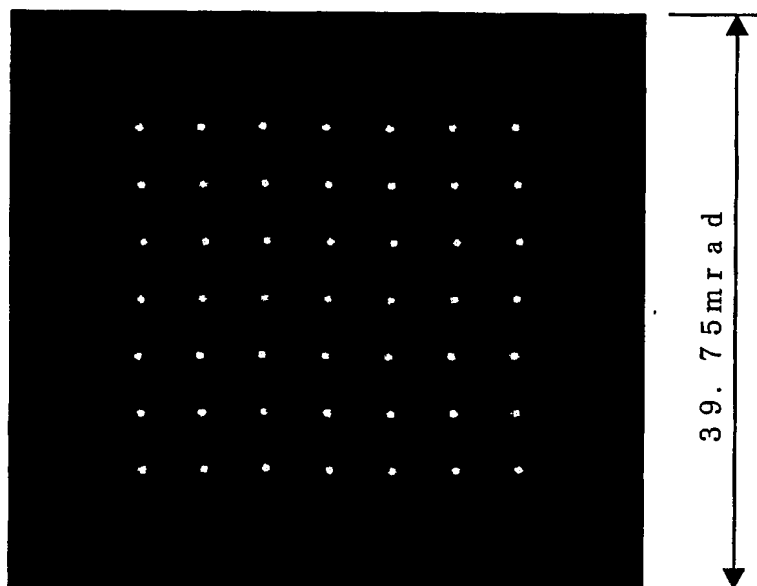
入射ビームの強度分布

【図5】



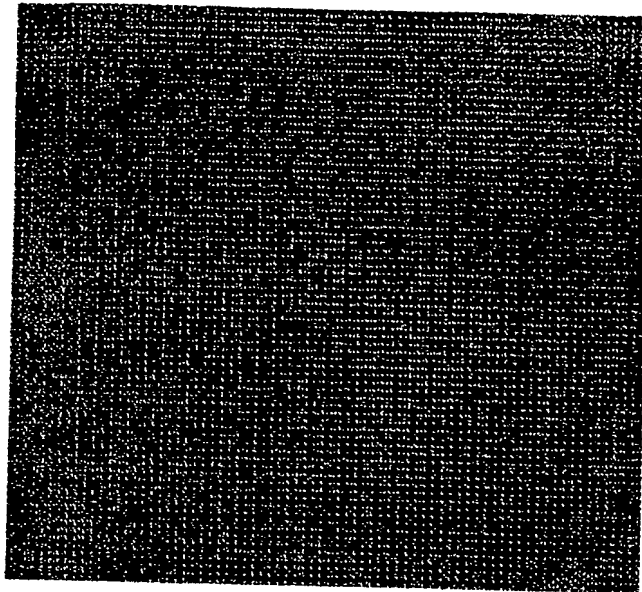
実施例1の DOE 設計パターン

【図6】



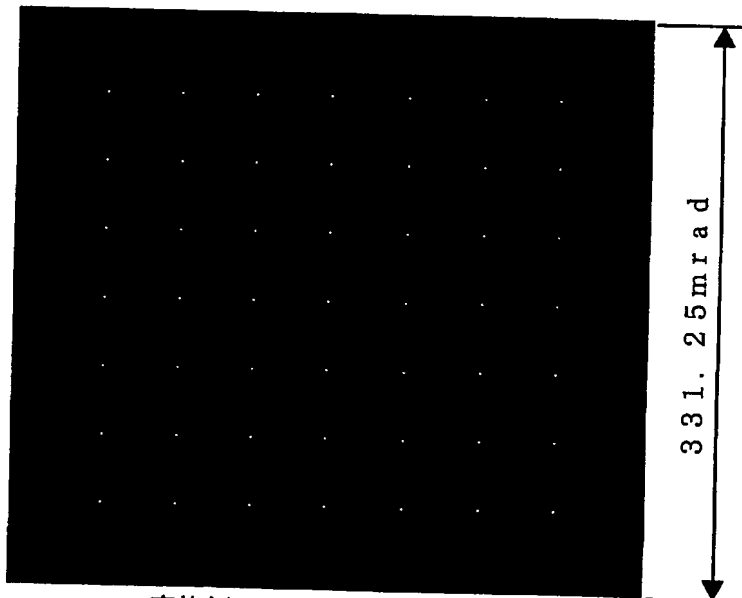
実施例1の角度スペクトル強度分布

【図7】



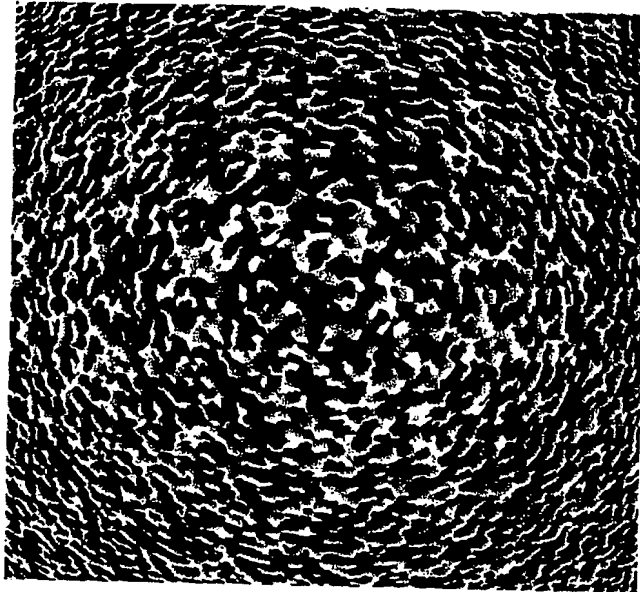
実施例2の DOE 設計パターン

【図8】



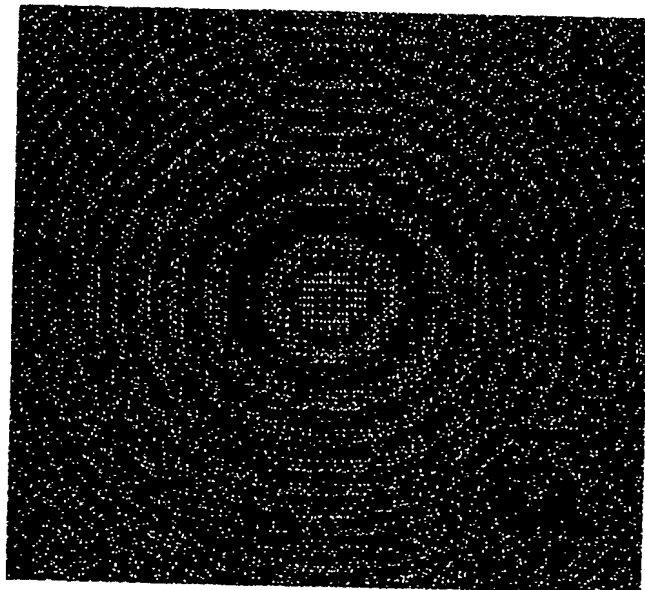
実施例2の角度スペクトル強度分布

【図9】



実施例 3 の DOE パターン

【図10】



実施例 4 の DOE パターン

【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 従来の回折型光学部品 (DOE) は一定パターンのユニットパターン Γ を縦横に繰り返し並列させたものであり高速フーリエ変換によって計算できるという利点があるが回折光の方向は離散的で予め決まった格子点の方向にしか出ない。格子点から外れた部位や全くランダムな方位にビームを分割するということはできないし格子点のピッチをある程度以上に細かくできない。

【解決手段】 DOE を構成する画素 (m, n) 全てに透過率 t_{mn} を与えて所望の方位 α 、 β の方向へのフーリエ変換の式を全部計算する。所望の方位 α 、 β は規則正しい配列をする格子点にないから、もはや高速フーリエ変換法 (FFT) による計算ができない。計算量が増えるのであるが格子から外れた不規則性ある回折パターンを生成することができる。また分解能 U 、 V を λ/aR 、 λ/bS (λ は波長、 aR 、 bS は DOE のサイズ) よりも小さい値にできる。レーザービームを高い分解能で任意の方向、数に分岐することが可能である。任意の位置に高い位置精度でレーザービームを多点一括照射することが可能となる。電子部品で要求される自由かつ高精度なスポット配置を実現することができる。レーザー加工の高速化、コスト低減に大きな効果がある。

【選択図】 図 2

特願 2 0 0 3 - 0 2 9 2 4 4

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[0 0 0 0 0 2 1 3 0]

1. 変更年月日

1 9 9 0 年 8 月 2 9 日

[変更理由]

新規登録

住 所

大阪府大阪市中央区北浜四丁目 5 番 3 3 号

氏 名

住友電気工業株式会社